

# 基于发光二极管光源的相机定标无线定位算法

白 勃<sup>1</sup> 田 骅<sup>2</sup> 李晓波<sup>3</sup>

<sup>1</sup>西安电子工程研究所, 陕西 西安 710100

<sup>2</sup>中国舰船研究院, 北京 100192

<sup>3</sup>中国人民解放军驻沈阳飞机工业(集团)有限公司军事代表室, 辽宁 沈阳 110850

**摘要** 针对现有无线定位算法精度较低和成本较高的不足, 结合基于发光二极管(LED)照明器件的可见光通信(VLC)系统, 考虑相机成像镜头材质不均、装配偏差等因素对真实图像的扭曲和畸变, 设计提出了一种新型的基于LED信号光源的相机定标定位算法。该算法根据接收机与LED信号光源的位置关系和通过VLC系统获取的LED信号光源的位置信息, 可以解算出接收机的位置和姿态信息, 并可以通过对准校正提高VLC系统抗干扰能力的影响。实验结果表明, 该算法在实现厘米级定位精度的同时, 可以解算出5°级别的姿态角度信息; 同时, 使用该算法根据位置信息进行对准校正的VLC系统误比特率较跟踪校正的VLC系统误比特率提高了两个数量级, 提高了VLC系统的抗干扰能力和稳定性。

**关键词** 光通信; 无线定位; 可见光通信; 发光二极管照明器件; 相机定标; 误比特率

中图分类号 TN95

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0205003

## Wireless Positioning Algorithm Based on Light Emitting Diode Lights and Camera Calibration

Bai Bo<sup>1</sup> Tian Hua<sup>2</sup> Li Xiaobo<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Xi'an Electronic Engineering Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710100, China*

<sup>2</sup>*China Ship Research and Development Academy, Beijing 100192, China*

<sup>3</sup>*People's Liberation Army Military Representation Office in Shenyang Aircraft Corporation, Shenyang, Liaoning 110850, China*

**Abstract** Considering the poor precision performance and high cost of the current wireless positioning algorithms, and combined with light emitting diode (LED) lights based visible light communication (VLC) system, a new wireless positioning algorithm based on camera calibration and with high precision is proposed, in view of camera distortion effect, non-isotropic, assembly deviation on captured pictures. This algorithm could calculate the receiver's position, as well as its posture, with the position relationship to the LEDs, and LED position generated through the VLC system, and improve the anti-interference performance of VLC system through tracking and pointing. Experimental results show that this algorithm could achieve a positioning precision of a centimeter level, and generate relatively accurate posture information less than 5°. In addition, the bit error rate of the VLC with tracking and pointing performs two orders of magnitude better than the one with merely tracking, and improves the anti-interference capability and stability of the VLC system.

**Key words** optical communications; wireless positioning; visible light communication; light emitting diode lighting device; camera calibration; bit error rate

**OCIS codes** 230.3670; 200.2605; 100.6890

## 1 引言

近年来,随着固体半导体照明(SSL)<sup>[1]</sup>技术的发展和半导体生产、加工工艺的成熟与完善,新一代的发光

收稿日期: 2014-08-22; 收到修改稿日期: 2014-09-21

作者简介: 白 勃(1985—),男,博士,工程师,主要从事无线通信方面的研究。E-mail: baiibo206@126.com

二极管(LED)<sup>[2-3]</sup>照明器件以其发光效率高、开关响应时间短、使用寿命长、绿色无污染、体积小、色域广阔、调光配色方便等诸多优点,已经成为继白炽灯、荧光灯之后的新一代照明设备。LED照明器件的推广使用也加速了可见光通信(VLC)<sup>[4-6]</sup>技术的商用化和产业化,并具有低碳环保、节能高效等深远意义。

基于LED信号光源的相机定标定位算法可以确定接收机与LED信号光源的位置关系,结合通过VLC系统获得的LED信号光源的位置信息或表示位置的ID标识信息,最终可以计算得出接收机的位置信息,实现高精度实时定位;同时也可以根据接收机与LED信号光源的位置关系调整接收机的角度姿态,实现可见光信号的最佳路径接收,提高VLC系统的抗干扰能力和稳定性。

日本Keio大学Nakagawa实验室的Sertthin等<sup>[7-9]</sup>提出了基于接收信号强度(RSS)的定位算法,并结合接收机的有效视场角(FoV),使用指南针和加速度计测量得到的偏转角和俯仰角校正最终的位置信息,但这些方法的定位精度不高、可靠性较低,并且需要额外的设备来获取接收机的接收角度姿态,增加了系统的复杂度和实现成本;Uchiyama等<sup>[10-13]</sup>根据LED信号光源的实际位置和相机的俯仰角、转动角和偏转角信息,提出了基于摄影测量学的无线定位算法,具有重要的参考价值,但由于没有考虑相机真实成像过程引起的图像扭曲和偏移效应,导致系统的可靠性不足;韩国Photonics Technology Institute研究中心的Hann等<sup>[14]</sup>根据室内VLC链路模型设计了新型的信号编码技术,利用RSS定位算法仿真实现了精度可达0.7 cm的室内定位系统,但由于该VLC链路模型没有考虑不同墙壁、地面对可见光信号的反射、吸收作用,并不适用于真实环境中的高精度定位;美国Intel公司的Roberts等<sup>[15]</sup>也提出了基于PD接收机的车间无线定位算法,但该系统只能应用于车辆间严格对齐条件下的相对位置测量,具有很大的局限性。

结合VLC系统的特性,本文设计新型的基于LED信号光源的相机定标定位算法,该算法使用图像传感器作为可见光信号接收机,综合考虑相机成像镜头材质不均和装配偏差等因素对真实图像的扭曲畸变,根据相机定标模型计算接收机的位置和姿态信息,具有很高的定位精度和实时性,可运用于定位精度要求较高的汽车自动驾驶、结构较为复杂的室内场所的导航等多个领域。

## 2 图像传感器定位模型

图像传感器的感光单元会根据曝光时间内(即图像传感器接收机感光时间内)入射到接收机FoV中光子的数量,激发产生对应数目的感应电子,经过后续处理电路的跨阻放大、采样保持、多级放大、模数转换后,输出不同字长的量化数值。可以通过调整相机镜头(即成像透镜组)改变图像传感器接收机的FoV,也可以通过改变相机光圈和曝光时间来控制入射光强度和产生感应光电流大小。

使用LED信号光源和图像传感器的定位模型如图1所示,位于天花板、墙壁等不同位置的LED信号光源在实现照明的同时,广播各自的位置信息和其他相关的数据信息,这些LED信号光源经过相机镜头成像在图像传感器上。根据LED信号光源与其像点的关系计算出接收机与LED信号光源的位置关系,结合通过VLC系统获得的LED信号光源的位置信息,最终可以计算得出接收机的位置信息。为减小入射背景光的干扰,通常会在相机镜头前添加一个滤色片。

为简化计算,假设相机镜头为定焦镜头,即相机镜头等效中心与图像传感器间的距离为定值。如图2所示,当LED信号光源引起相机对焦失败或成像虚化时,一个虚化的像斑AB会出现在图像传感器MN上,而不



图1 图像传感器定位模型

Fig.1 Image sensor based positioning system model

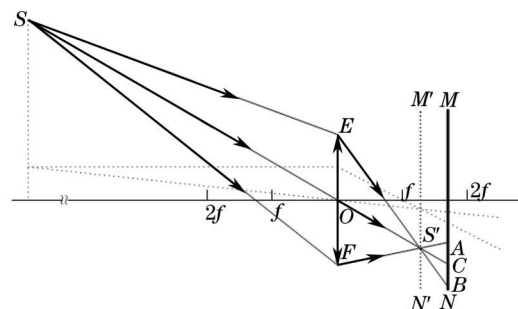


图2 相机对焦失败原理图

Fig.2 Camera focusing failure diagram

是LED信号光源S清晰的像点S'会出现在图像传感器MN上。LED信号光源S发射的且经过相机镜头EF有效中心O的光束会落在C点,因为O为相机镜头EF的中心,根据三角形相似定理,C点即为光斑AB的中心。因此,对焦失败的LED信号光源像点在图像传感器上的位置可以取为其虚化像斑的几何中心。

### 3 相机定标定位算法

如图3所示,真实位置(即在导航坐标系中的坐标)为 ${}^N[X, {}^N Y, {}^N Z]$ 的LED信号光源,经过相机镜头投影成像在图像传感器上。根据相机定标模型,考虑相机镜头对入射光线的扭曲畸变,相机镜头材质不均匀引起相机镜头几何中心与光学中心的偏差,以及装配时相机镜头光学中心和图像传感器中心的偏差等因素的影响,LED信号光源像点在图像传感器上的位置坐标 $[U, V]$ 应为

$$[U, V]^T = h_1(X'', Y'') = [f_x X'' + C_x, f_y Y'' + C_y]^T, \quad (1)$$

$$[X'', Y'']^T = h_2(X', Y', Z') = \begin{bmatrix} X'[1 + k_1 Z' + k_2 (Z')^2] + 2p_1 X' Y' + p_2 [Z' + 2(X')^2] \\ Y'[1 + k_1 Z' + k_2 (Z')^2] + 2p_2 X' Y' + p_1 [Z' + 2(Y')^2] \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$[X', Y', Z']^T = h_3({}^c X, {}^c Y, {}^c Z) = [{}^c X / {}^c Z, {}^c Y / {}^c Z, (X')^2 + (Y')^2]^T = \left[ {}^c X / {}^c Z, {}^c Y / {}^c Z, \frac{({}^c X)^2 + ({}^c Y)^2}{{}^c Z^2} \right]^T, \quad (3)$$

$${}^c P = [{}^c X, {}^c Y, {}^c Z]^T = h_4(X) = R_N^c ({}^N P - {}^N T_{Nc}) = R_N^c \left( [{}^N X, {}^N Y, {}^N Z]^T - [{}^N X_c, {}^N Y_c, {}^N Z_c]^T \right), \quad (4)$$

式中 ${}^c P$ 为LED信号光源在相机坐标系中的位置坐标, $[{}^N X_c, {}^N Y_c, {}^N Z_c]$ 为接收机的真实位置,即相机镜头的光学中心在导航坐标系中的位置坐标,

$$R_N^c = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & \sin \varphi \\ 0 & -\sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi \cos \theta & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ -\sin \psi \cos \varphi + \cos \psi \sin \theta \sin \varphi & \cos \psi \cos \varphi + \sin \psi \sin \theta \sin \varphi & \cos \theta \sin \varphi \\ \sin \psi \sin \varphi + \cos \psi \sin \theta \cos \varphi & -\cos \psi \sin \varphi + \sin \psi \sin \theta \cos \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中 $\varphi$ 、 $\theta$ 和 $\psi$ 分别为接收机的航向角、俯仰角和滚转角, $[f_x, f_y]$ 为相机等效镜头在X轴和Y轴方向的焦距, $[C_x, C_y]$ 为图像传感器在X轴和Y轴方向中心的位置坐标, $p_1, p_2, k_1, k_2$ 分别为相机等效镜头在X轴和Y轴方向上的径向畸变和切向畸变,其余皆为中间变量。

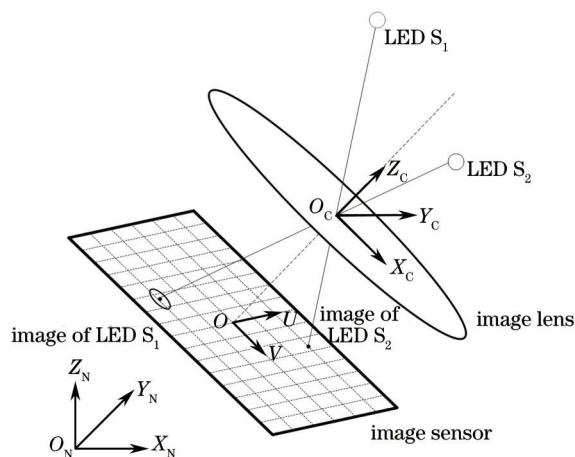


图3 相机定标定位算法模型

Fig.3 Model of camera calibration positioning algorithm

在测量LED信号光源像点或虚化像斑几何中心的位置时,会由于对焦失败、LED信号光源形状大小变化等因素引入测量误差。那么,第K个LED信号光源像点在图像传感器上的位置应为

$$Y_k = [U_k, V_k]^T = h(P_c, P_k) + \nu_k, \quad (6)$$

式中 $P_k = [{}^N X_k, {}^N Y_k, {}^N Z_k]$ 为第K个LED信号光源在导航坐标系中的位置, $P_c = [{}^N X_c, {}^N Y_c, {}^N Z_c, \psi, \theta, \varphi]^T$ 为接收机在导

航坐标系中的位置和姿态信息,  $\boldsymbol{\nu}_k$  为叠加的噪声变量。

当  $N$  个 LED 信号光源入射到接收机的 FoV 时, 可得  $2N$  个非线性方程, 求解接收机状态信息的问题便可以抽象为求解  $6 \times 1$  维未知向量  $\boldsymbol{P}_c = [{}^N X_c, {}^N Y_c, {}^N Z_c, \psi, \theta, \varphi]^T$  的非线性方程组的问题。该非线性方程组是根据接收机在导航坐标系中的位置坐标和姿态角度信息, LED 信号光源在导航坐标系中的位置坐标, 及其在图像传感器上像点实际测量结果联合建立的, 而 LED 信号光源像点的测量误差  $\boldsymbol{\nu}_k$  可以通过多次实验测量得出先验统计值, 所以该非线性方程组的解是存在的, 即该非线性方程组可解。由于非线性方程组解的维数为 6, 而每个 LED 信号光源可以提供 2 个非线性方程, 同时为了有效去除非线性方程组的假解, 那么, 为有效求解接收机的位置姿态信息, 至少需要 4 个 LED 信号光源。

将(6)式在接收机状态信息的估计值  $\hat{\boldsymbol{P}}_c$  处线性化展开

$$\boldsymbol{Y}_k = h(\boldsymbol{P}_c, \hat{\boldsymbol{P}}_k) + \boldsymbol{\nu}_k \approx h(\hat{\boldsymbol{P}}_c, \boldsymbol{P}_k) + \left. \frac{\partial h^T}{\partial \boldsymbol{P}_c^T} \right|_{\boldsymbol{P}_c = \hat{\boldsymbol{P}}_c} \cdot (\boldsymbol{P}_c - \hat{\boldsymbol{P}}_c) + \boldsymbol{\nu}_k \approx h(\hat{\boldsymbol{P}}_c, \boldsymbol{P}_k) + \left. \frac{\partial h^T}{\partial \boldsymbol{P}_c^T} \right|_{\boldsymbol{P}_c = \hat{\boldsymbol{P}}_c} \cdot \delta \boldsymbol{P}_c + \boldsymbol{\nu}_k, \quad (7)$$

定义  $\hat{\boldsymbol{Y}}_k = h(\hat{\boldsymbol{P}}_c, \boldsymbol{P}_k)$ , 那么线性化展开的误差

$$\delta \boldsymbol{Y}_k = \boldsymbol{Y}_k - \hat{\boldsymbol{Y}}_k \approx \left. \frac{\partial h^T}{\partial \boldsymbol{P}_c^T} \right|_{\boldsymbol{P}_c = \hat{\boldsymbol{P}}_c} \cdot \delta \boldsymbol{P}_c + \boldsymbol{\nu}_k = \boldsymbol{H}_k \Big|_{\boldsymbol{P}_c = \hat{\boldsymbol{P}}_c} \cdot \delta \boldsymbol{P}_c + \boldsymbol{\nu}_k, \quad (8)$$

式中

$$\boldsymbol{H}_k = \frac{\partial h^T(\hat{\boldsymbol{P}}_c, \boldsymbol{P}_k)}{\partial \boldsymbol{P}_c^T} = \frac{\partial h^T}{\partial [{}^N X_c, {}^N Y_c, {}^N Z_c, \psi, \theta, \varphi]} = \frac{\partial h_1^T(X'', Y'')}{\partial [X'', Y'']} \cdot \frac{\partial h_2^T(X', Y', Z')}{\partial [X', Y', Z']} \cdot \frac{\partial h_3^T({}^c X, {}^c Y, {}^c Z)}{\partial [{}^c X, {}^c Y, {}^c Z]} \cdot \frac{\partial h_4^T(\hat{\boldsymbol{P}}_c, \boldsymbol{P}_k)}{\partial \boldsymbol{P}_c^T} = \boldsymbol{H}_1 \cdot \boldsymbol{H}_2 \cdot \boldsymbol{H}_3 \cdot \boldsymbol{H}_4, \quad (9)$$

$$\boldsymbol{H}_1 = \frac{\partial h_1^T(X'', Y'')}{\partial [X'', Y'']} = \begin{bmatrix} f_x & f_y \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\boldsymbol{H}_2 = \frac{\partial h_2^T(X', Y', Z')}{\partial [X', Y', Z']} = \begin{bmatrix} 1 + k_1 Z' + k_2 (Z')^2 + 2p_1 Y' + 4p_2 X', & 2p_2 Y' \\ 2p_1 X', & 1 + k_1 Z' + k_2 (Z')^2 + 2p_2 X' + 4p_1 Y' \\ (k_1 + 2k_2) X' + p_2, & (k_1 + 2k_2) Y' + p_1 \end{bmatrix}^T, \quad (11)$$

$$\boldsymbol{H}_3 = \frac{\partial h_3^T({}^c X, {}^c Y, {}^c Z)}{\partial [{}^c X, {}^c Y, {}^c Z]} = \begin{bmatrix} 1/{}^c Z & 0 & -{}^c X / ({}^c Z)^2 \\ 0 & 1/{}^c Z & -{}^c Y / ({}^c Z)^2 \\ 2{}^c X / ({}^c Z)^2 & 2{}^c Y / ({}^c Z)^2 & -2[({}^c X)^2 + ({}^c Y)^2] / ({}^c Z)^3 \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$\boldsymbol{H}_4 = \frac{\partial h_4^T(\hat{\boldsymbol{P}}_c, \boldsymbol{P}_k)}{\partial \boldsymbol{P}_c^T} = \begin{bmatrix} -R_N^c \cdot \boldsymbol{I}, & \frac{\partial h_4^T(\hat{\boldsymbol{P}}_c, \boldsymbol{P}_k)}{\partial [\psi, \theta, \varphi]} \end{bmatrix}, \quad (13)$$

$$\frac{\partial h_4^T(\hat{\boldsymbol{P}}_c, \boldsymbol{P}_k)}{\partial [\psi, \theta, \varphi]} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{D}_k \cdot \frac{\partial (R_N^c)^T}{\partial \psi} \\ \boldsymbol{D}_k \cdot \frac{\partial (R_N^c)^T}{\partial \theta} \\ \boldsymbol{D}_k \cdot \frac{\partial (R_N^c)^T}{\partial \varphi} \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\boldsymbol{D}_k = [{}^N X, {}^N Y, {}^N Z] - [{}^N X_c, {}^N Y_c, {}^N Z_c], \quad (15)$$

其中  $\boldsymbol{I}$  为  $3 \times 3$  的单位矩阵。那么接收机状态信息的估计值  $\hat{\boldsymbol{P}}_c$  与真实值  $\boldsymbol{P}_c$  的误差为

$$\delta \boldsymbol{P}_c = \left[ \boldsymbol{H}_k \Big|_{\boldsymbol{P}_c = \hat{\boldsymbol{P}}_c} \right]^{-1} \cdot (\delta \boldsymbol{Y}_k - \boldsymbol{\nu}_k) = \left[ \boldsymbol{H}_k \Big|_{\boldsymbol{P}_c = \hat{\boldsymbol{P}}_c} \right]^{-1} \cdot [\boldsymbol{Y}_k - h(\hat{\boldsymbol{P}}_c, \boldsymbol{P}_k) - \boldsymbol{\nu}_k], \quad (16)$$

式中  $[\cdot]^{-1}$  表示矩阵的求逆运算。

任取接收机状态信息的估计值  $\hat{\boldsymbol{P}}_c$  作为初始值, 使用接收机状态信息的估计值  $\hat{\boldsymbol{P}}_c$  与真实值  $\boldsymbol{P}_c$  的误差  $\delta \boldsymbol{P}_c$  作为修正量更新估计值  $\hat{\boldsymbol{P}}_c$ , 设定可接受的计算误差  $|\delta \boldsymbol{P}_c| \leq \varepsilon$ ,  $|\cdot|$  为求模运算符, 通过 Newton-Raphson 迭代方法便可计算出接收机在导航坐标系中的状态信息  $\boldsymbol{P}_c$ 。

## 4 实验分析

### 4.1 定位算法精度分析

图4分别给出了相机定标定位系统中的接收机、LED信号光源和检测到的LED信号光源像点。选用Mikrotron EoSens MC1363高速相机作为图像传感器接收机,内置的图像传感器为Cypress LUPA1300-2,相机镜头为Navitar NMV-8M1的8 mm定焦镜头,选用12个均匀分布在半径为6.4 cm圆盘上的Osram OPA741照明器件作为LED信号光源,为有效捕获识别每个LED信号光源均安装了用于扩束的光学透镜。

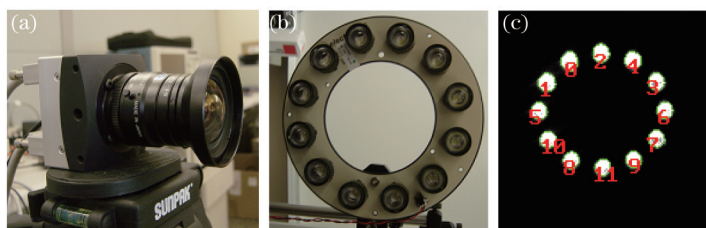


图4 相机定标定位系统。(a)可见光信号接收机;(b)LED信号光源;(c)LED信号光源像点

Fig.4 Camera calibration based positioning system. (a) Visible light receiver; (b) LED signal light; (c) LED light images

设定12个LED信号光源的几何中心为导航坐标系的原点,照明方向为X轴的负方向,将相机从位置 $(-2.00, -0.55, -0.88)$ 沿X轴正向缓慢移动0.70 m,然后沿Y轴负方向缓慢移动1.10 m;在移动的过程中使用高速相机拍摄LED信号光源,并将拍摄到的照片通过使用CameraLink传输协议的高速线缆传输至视频采集卡Matrox Radient eCL RAD2GSF。将LED信号光源像点[如图4(c)所示]的几何中心作为像点的位置存储至计算机中;设定迭代的终止条件为 $|\delta \mathbf{P}_c| \leq 1.0 \times 10^{-10}$ ,任取相机状态信息的初始值,使用Newton-Raphson迭代方法,根据表1给出的相机焦距、原点位置、畸变系数等内部参数,以及LED信号光源在导航坐标系中的位置坐标,便可以计算得出如图5所示的相机定标定位算法定位性能曲线。从图5容易看出,相机定标定位算法的定位结果与相机的真实移动位置基本吻合,平均定位误差为

$$\delta \mathbf{P}_c = \begin{bmatrix} \delta^N X_c, \delta^N Y_c, \delta^N Z_c \\ \delta \psi, \delta \theta, \delta \varphi \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} 0.0342 \text{ m}, 0.0781 \text{ m}, 0.0401 \text{ m}, \\ 1.6614^\circ, 4.3946^\circ, -2.5098^\circ \end{bmatrix}^T, \quad (17)$$

最大的定位误差仅为7.81 cm,可以实现厘米级精度定位,同时解算出不大于5°级别的姿态信息,可用于车道级定位精度要求的ITS汽车自动驾驶、结构较为复杂的室内场所的导航等。

表1 基本相机设置参数

Table 1 Basic parameters of camera

Parameter	Value
Exposure time $t_{exp} / \mu\text{s}$	20
Aperture $1/f$	1/2.8
Image lens diameter $D / \text{mm}$	38
Pixel radius $r_{\text{pixel}} / \mu\text{m}$	14
Focus in X axis $f_x$	$606.4929 \times r_{\text{pixel}}$
Focus in Y axis $f_y$	$607.8219 \times r_{\text{pixel}}$
Origin in X axis $C_x$	$612.5981 \times r_{\text{pixel}}$
Origin in Y axis $C_y$	$508.0391 \times r_{\text{pixel}}$
Radial distortion in X axis $k_1$	-0.1776
Radial distortion in Y axis $k_2$	0.1110
Tangential distortion in X axis $p_1$	0.0049
Tangential distortion in Y axis $p_2$	0.0004

### 4.2 定位算法对VLC系统性能的影响

VLC系统的性能会受到接收机姿态、信号光入射角等因素的影响,降低系统的抗干扰能力和系统稳定性。结合定位算法确定的接收机与LED信号光源的位置关系调整接收机的角度姿态,使入射可见信号光路与接收机光轴重合,可以提高VLC系统的抗干扰能力。

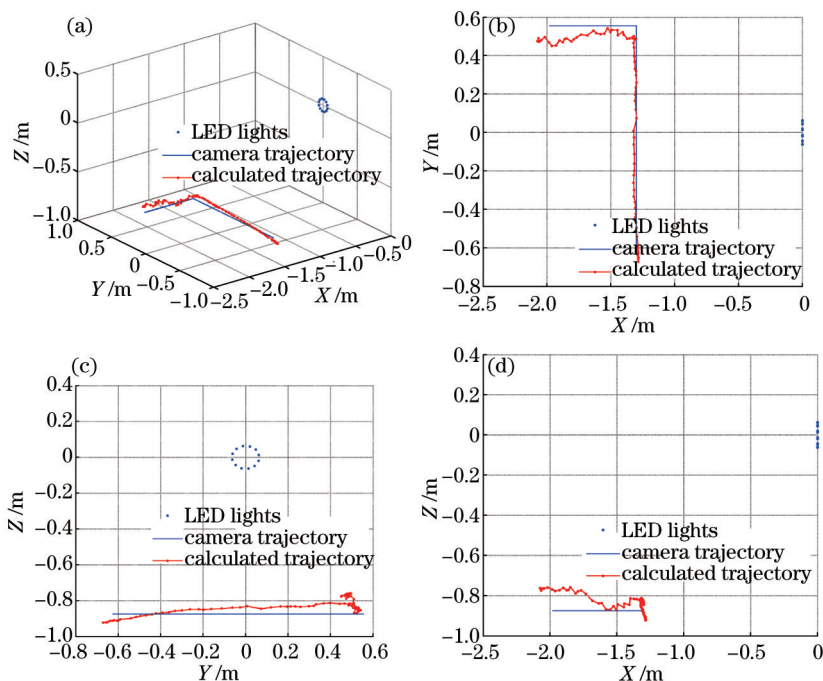


图5 相机定标定位算法测量结果。(a) 三维立体图; (b) 俯视图; (c) 前视图; (d) 右视图

Fig.5 Measurement results of camera calibration positioning algorithm. (a) Three dimension view; (b) top view; (c) front view; (d) right side view

如图6(a)所示,LED信号光源的真实位置坐标为(0,0,0),照明方向为Y轴的正方向,接收机的起始位置为(5,10,5),并以0.10 m/s的速度匀速直线运动至坐标点(6.9,10,6.9)处;LED信号光源像点在图像传感器上的移动轨迹如图6(b)所示,为保证VLC系统的稳定性,必须实时跟踪LED信号光源像点进行解调接收。设定LED信号光源发射的表示比特0和1的可见光信号功率分别为140 mW和160 mW,VLC系统的码速率 $R_b=100$  kb/s,相机曝光时间取最大值 $t_{exp}=5 \mu s$ ,根据表2给出的图像传感器接收机的器件参数,图7给出了使用图像传感器接收机的VLC系统,在无跟踪校正、无对准校正(含跟踪校正)和对准校正(含跟踪校正)时的误比特率(BER)曲线。从图7容易看出,随着系统运行时间的增加,接收机与LED信号光源的距离将逐渐增大,可见光信号的出射角也将逐渐增大,导致无对准校正和对准校正的VLC系统BER性能均急剧下降;同时,对准校正的VLC系统BER性能远远优于无对准校正的VLC系统BER性能,并随着系统运行时间的增加,对准校正的VLC系统BER与无对准校正VLC系统BER间的差距将逐渐缩小。在初始时刻,无对准校正和对准校正的VLC系统BER分别为 $1.62 \times 10^{-14}$ 和 $7.68 \times 10^{-16}$ ,两者相差近两个数量级;而在20 s时,VLC系统的BER分别为 $1.50 \times 10^{-6}$ 和 $1.96 \times 10^{-7}$ ,两者相差仅为一个数量级。在初始时刻,无跟踪校正的VLC系统BER性能与无对准校正VLC系统BER性能完全相同,但随着系统运行时间的增加,当LED信号光源的像点移出图像传感器的高速采样区域后,无跟踪校正的VLC系统将接收不到任何有效的可见光信号,无法正常工作,导致通信中断。

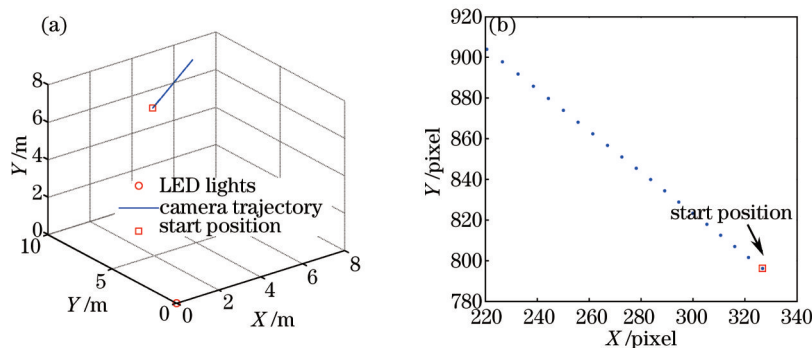


图6 VLC系统设置。(a) 系统设置图; (b) 光源像点轨迹图;

Fig.6 Configuration of VLC system. (a) System configuration; (b) trajectory of LED light image on image sensor

表2 图像传感器参数

Table 2 Parameters of image sensor

Parameter	Value
Pixel radius $r_{\text{pixel}}/\mu\text{m}$	14
Pixel number $N_{\text{um}}$	1280×1024
Image lens radius $r_{\text{lens}}/\text{mm}$	5
Image lens refraction index $n_{\text{lens}}$	0.8
Filter gain $T_s$	0.8
System gain $K$	0.0325
Photoelectric conversion efficiency $\eta/\%$	35
Statured electron number $\mu_{\text{sat}}/10^4$	3
Mean electron number of dark current noise $\mu_{\text{d.c.}}/s^{-1}$	5000
Mean electron number of other dark noise $\mu_{\text{d.o}}$	37
Standard deviation electron number of other dark noise $\sigma_{\text{d.o}}$	37
Field of view $\Psi/(\circ)$	80

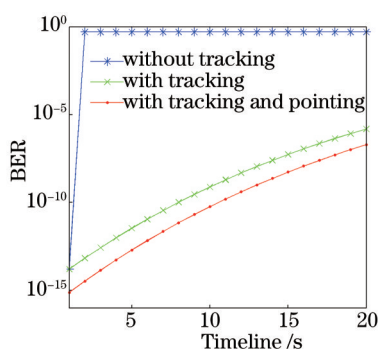


图7 VLC系统BER曲线

Fig.7 BER performance of VLC system

## 5 讨 论

为减少非信号光源和其他背景光的干扰,接收机的FoV一般取值较小。在公路、街道、走廊等照明光源分布较为稀疏的环境下,常常会出现检测不到LED信号光源的情况,导致基于LED信号光源定位算法的失效。为解决LED信号光源丢失和检测到的LED信号光源像点个数不足的问题,增强定位算法的稳定性,可以使用惯性测量单元(IMU)进行辅助定位。即利用IMU实时测量接收机的加速度、角速度信息,根据惯性定律和坐标系转换关系,辅助计算接收机的实时位置姿态信息。当无法检测到LED信号光源时,可以使用惯性导航算法直接计算接收机的位置姿态信息;当检测到的LED信号光源像点不足4个时,可以结合Kalman滤波理论和相机定标定位算法计算接收机的位置姿态信息;而当检测到的LED信号光源像点大于4时则可直接使用相机定标定位算法计算接收机的位置姿态信息。

## 6 结 论

设计提出了一种新型的基于LED信号光源的高精度相机定标定位算法,并研究分析了该算法对VLC系统抗干扰能力的影响。实验结果表明,该算法可以在实现厘米级定位精度的同时,解算出接收机包括航向角、俯仰角和滚转角的较高精度的姿态信息;而使用对准校正的VLC系统BER则远远优于无对准校正的VLC系统BER,具有更高的抗干扰能力和系统稳定性。

## 参 考 文 献

1 N Tansu, F So, Q Pei. Guest editorial recent advances in solid state lighting[J]. Journal of Display Technology, 2013, 9(4): 187-189.

- 2 Tang Danying, Li Honglei, Chen Xiongb, *et al.*. Effects of detector's nonlinearity on frequency response of visible light communication system[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(4): 0405002.  
唐丹颖, 李洪磊, 陈雄斌, 等. 探测器非线性对可见光通信系统幅频响应的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(4): 0405002.
- 3 Yin Luqiao, Weng Fei, Song Peng, *et al.*. Thermal interact effects of LED chip with YAG phosphor layer[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0323002.  
殷录桥, 翁 菲, 宋 朋, 等. LED芯片与YAG荧光粉的相互热作用[J]. 光学学报, 2014, 34(3): 0323002.
- 4 Jinguo Quan, Weihao Liu, Shuang Jin, *et al.*. Range-rate tradeoffs in the communication between LED traffic lights and vehicles[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(10): 102201.
- 5 Jinguo Quan, Bo Bai, Shuang Jin, *et al.*. Indoor positioning modeling by visible light communication and imaging[J]. Chin Opt Lett, 2014, 12(5): 052201.
- 6 Rongling Li, Yuanquan Wang, Chanjuan Tang, *et al.*. Improving performance of 750-Mb/s visible light communication system using adaptive Nyquist windowing[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(8): 080605.
- 7 C Sertthin, E Tsuji, M Nakagawa, *et al.*. A switching estimated receiver position scheme for visible light based indoor positioning system[C]. 4th International Symposium on Wireless Pervasive Computing, 2009. 1-5.
- 8 D Naruo, C Sertthin, S Haruyama, *et al.*. High accuracy indoor positioning system utilizing optical power difference in visible light communication[J]. IEICE Technical Report, USN2009-26, 2009, 131(109):157-162.
- 9 C Sertthin, T Ohtsuki, M Nakagawa. 6-axis sensor assisted low complexity high accuracy-visible light communication based indoor positioning system[J]. IEICE Transactions on Communications, 2010, E93-B(11): 2879-2891.
- 10 H Uchiyama, M Yoshino, H Saito, *et al.*. Photogrammetric system using visible light communication[C]. 34th Annual Conference of IEEE on Industrial Electronics, 2008, 1771-1776.
- 11 M Yoshino, S Haruyama, M Nakagawa. High-accuracy positioning system using visible LED lights and image sensor[C]. IEEE Proc. Radio and Wireless Symposium, 2008, 439-442.
- 12 T Tanaka, S Haruyama. New position detection method using image sensor and visible light LEDs[C]. 2nd International Conference on Machine Vision, 2009. 150-153.
- 13 S Hijikata, K Terabayashi, K Umeda. A simple indoor self-localization system using infrared LEDs[C]. 6th International Conference on Networked Sensing Systems, 2009. 45-51.
- 14 S Hann, J Kim, S Jung, *et al.*. White LED ceiling lights positioning systems for optical wireless indoor applications[C]. 36th European Conference and Exhibition on Optical Communication, 2010.
- 15 R Roberts, P Gopalakrishnan, S Rathi. Visible light positioning: Automotive use case[C]. IEEE Vehicular Networking Conference, 2010. 309-314.

栏目编辑: 王晓琰